

熱帯・亜熱帯の海面水温および対流活動を指標とした季節予報ガイダンスによる 2024年夏の日本域の気温予測と高温要因の考察

小越 久美・鈴木 はるか(日本気象協会)

1 はじめに

季節予報ガイダンスは一般的に大気海洋結合モデルの直上格子点値を説明変数に用いた線形重回帰によって作成されるが、中緯度における予測精度は十分ではない。一方で、大気海洋結合モデルにおける ENSO をはじめとした熱帯や亜熱帯の精度は高く、SST よりも海盆間相互作用の結果である対流活動を指標として用いることで、東アジアの天候や気温と高い相関が得られることも分かっている(Ueda et al.,2015, Kuramochi et al.,2021)。また近年は機械学習を用いた手法が進展しており、欧州や北米において数値予報モデルよりも高い精度で予測できることが報告されている(Gibson et al.,2021, Cohen et al.,2018)。

そこで本研究では、熱帯・亜熱帯域の海面水温および対流活動を指標とした機械学習による日本域の季節予報ガイダンスを構築した。2023年度の長期予報研究連絡会では対流活動のみを指標として用いたが(小越・鈴木,2023)、新たに海面水温を指標として導入し、その長い周期性を利用してリードタイムの延長を図った。

2023年に並び統計史上1位の猛暑となった2024年夏の日本域の気温予測の結果を紹介し、機械学習により選択された指標から、高温要因について考察する。

2 説明変数の検討

2.1 指標とするエリアの抽出

はじめに、日本の月平均気温と、対流活動および SST の相関分析を実施し(図1)、相関の高いエリアを指標として抽出した(表1)。対流活動の指標として OLR(Outgoing Longwave Radiation)を用い、データは ERA5 より OLR(Top net thermal radiation $W m^{-2}$)と SST(Sea surface

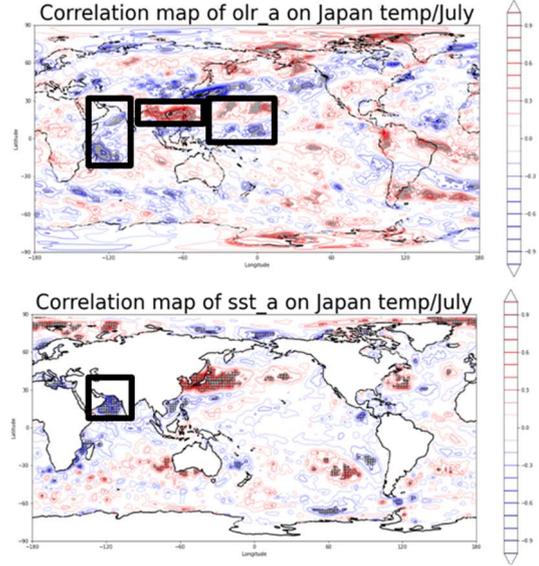


図1 日本の7月の平均気温とOLR(上段)・SST(下段)のアノマリ相関 期間:1979-2020年 線形トレンド偏差 ハッチは $P < 0.05$ で有意 四角枠は北緯20度~南緯20度で有意なエリア OLRの符号は正が対流活発、負が対流不活発

表1 指標とする OLR・SST を抽出したエリア

カテゴリ	領域	N	S	W	E
ENSO監視海域	NINO_12	0	-10	-90	-80
	NINO_3	5	-5	-150	-90
	NINO_34	5	-5	-170	-120
	NINO_4	5	-5	160	-150
	NINO_WEST	15	0	130	150
フィリピン付近	PH	20	10	110	140
	PH_N	25	10	110	130
アジアモンスーン域	N	30	15	70	140
	S	10	0	70	140
	W	25	5	80	105
	E	20	5	105	140
海洋大陸	MC	5	-5	110	135
インド洋(全体・東・西)	IOBW	20	-20	40	100
	SETIO	0	-10	90	110
	WTIO	10	-10	50	70
	WTIO-SETIO	IOD			
アラビア海	WTIO_N	30	10	40	80
日付変更線の西	DATEW	10	-10	130	180
日付変更線付近	DL	5	-5	170	-170
対流ジャンプ付近	JUMP	30	10	130	180
大西洋(北・南)	TNA	25	5	-55	-15
	TSA	0	-20	-30	10

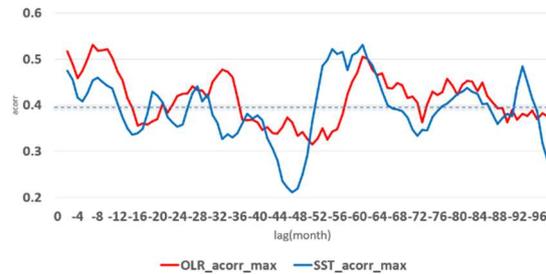


図2 日本の7月平均気温と OLR・SST 指標のラグ相関(絶対値)の全エリアにおける最大値5ヶ月移動平均

1996-2021年 赤線: OLR 青線: SST 点線より上は $P < 0.05$

temperature K)の月平均値、気象庁より日本の月平均気温(°C)を利用した。エリアは既往研究を参考に区切っている。

2.2 予測期間の延長可能性の確認

予測期間の延長可能性を検証するため、日本の月平均気温と OLR・SST 指標のラグ相関を計算した。7月の例を図2に示す。OLRは直近から1年程度前までに高い相関がある。また、OLR、SSTともに5年程度遡っても有意な相関が得られる時期がある。海洋の周期性を利用することで予測期間を延長できる可能性が示唆された。

3 ガイダンスの構築

3.1 データ

2.の説明変数の検討で得られた結果をもとに、日本の天候を予測する季節予報ガイダンスを構築する。OLRは、数値予報モデルのハインドキャストを利用する。

【説明変数】

要素①: OLR (Top net thermal radiation $W m^{-2}$)

※ECMWF(Set V - SEAS)

要素②: SST (Sea surface temperature K)

※ERA5

【目的変数】

要素: 月平均気温(平年差°C) ※気象庁

エリア: 北日本・東日本・西日本×日本海側・太平洋側(計6エリア)

【学習期間】1994-2023年

【テスト期間】2024年

3.2 ガイダンスの構築手法

ガイダンスの構築には線形重回帰を用い、24ヶ月前時点からの予測を行った。ラグ相関(図2)の結果より、OLRは5ヶ月前までの予測値(アンサンブル平均)および12ヶ月前までのイニシャル値を、変動が安定しているSSTは60ヶ月前までの解析値を説明変数として用いた。LASSO回帰(Tibshirani, 1996)により指標を選択し、さらに $P \leq 0.05$ となる指標に絞った。

4 結果

表2上段は2024年7月8月の平均気温と21ヶ月前から3ヶ月前時点の予測結果を示す。この期間は全国平均気温が観測史上1位から2位の記録的高温となったが、7月、8月の誤差は北日本太平洋側を除いて21ヶ月前時点から1°C未満に収まった。表2下段は、3ヶ月前時点の気象庁ガイダンスの誤差との差を示す。7月と8月はほとんどのエリアで本ガイダンスの誤差が小さかった。

表2 上段: 2024年7月8月の月平均気温と予測誤差(予測-観測) 赤は誤差の絶対値1°C以上

下段: 気象庁ガイダンス(3ヶ月前)との差(本ガイダンス誤差-気象庁ガイダンス誤差) 黒字は本ガイダンスの誤差が気象庁ガイダンスより小さいことを示す

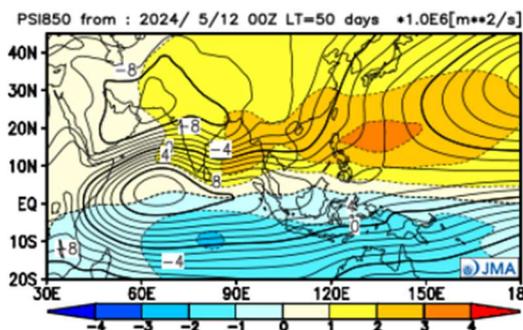
		Forecast time					
Fct Month	Area	観測値	3	6	12	18	21
7	北日本日本海側	1.9	-0.1	0.0	-0.1	-0.3	-0.3
	北日本太平洋側	3.2	-1.9	-1.7	-1.4	-1.9	-2.0
	東日本日本海側	1.8	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
	東日本太平洋側	2.5	-0.9	-0.9	-0.7	-0.8	-0.9
	西日本日本海側	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	西日本太平洋側	1.8	-0.6	-0.6	-0.6	-0.7	-0.7
8	北日本日本海側	2.0	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3
	北日本太平洋側	2.5	-0.2	-0.2	-0.2	-0.5	-0.7
	東日本日本海側	1.5	0.6	0.7	0.7	0.6	0.3
	東日本太平洋側	1.9	-0.2	-0.2	-0.3	-0.5	-0.6
	西日本日本海側	1.9	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.6
	西日本太平洋側	1.7	-0.8	-0.8	-0.8	-0.7	-0.7

		Forecast time					
Fct Month	Area	3	6	12	18	21	
7	北日本日本海側	-1.1	-1.2	-1.1	-0.9	-0.9	
	北日本太平洋側	-0.4	-0.6	-0.9	-0.4	-0.3	
	東日本日本海側	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	
	東日本太平洋側	-0.7	-0.7	-0.9	-0.8	-0.8	
	西日本日本海側	-1.1	-1.1	-1.1	-1.1	-1.1	
	西日本太平洋側	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	-0.6	
8	北日本日本海側	-1.0	-1.0	-1.0	-1.1	-1.1	
	北日本太平洋側	-1.6	-1.6	-1.6	-1.3	-1.1	
	東日本日本海側	0.1	0.2	0.2	0.1	-0.2	
	東日本太平洋側	-0.7	-0.7	-0.6	-0.4	-0.3	
	西日本日本海側	-0.7	-0.7	-0.6	-0.6	-0.4	
	西日本太平洋側	-0.2	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	

5 考察

5.1 2024年夏の循環場の予測と実際

気象庁異常気象分析検討会の報告によれば、2024年夏の高温要因には地球温暖化や中緯度全体の大気の昇温、偏西風の蛇行や日本近海の海面水温の昇温などが挙げられるが、中でも太平洋高気圧を強める一因となったフィリピン



01Jul.2024 - 30Jul.2024

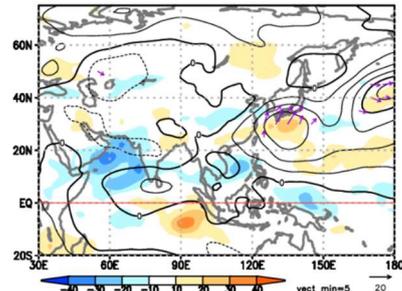


図 3 左：CPS3による5月イニシャル7月の850hPa 流線関数& anomaly 予測(m²/s)

右：7/1-7/30のOLR (W/m²)&850hPa 流線関数(m²/s)&WAF(m²/s²)anomalyの解析値 ※TCCより

表 3 9ヶ月前時点の東日本日本海側の7月平均気温(線形トレンド偏差℃)の予測式

FCT	No	Feature_lag	month	Feature	Coef	P	R2 adj
9	①	9ヶ月前	10月	アジアモンスーン域北OLR予測	0.51	0.01	0.56
	②	16ヶ月前	3月	IOD(SST)	0.62	0.00	

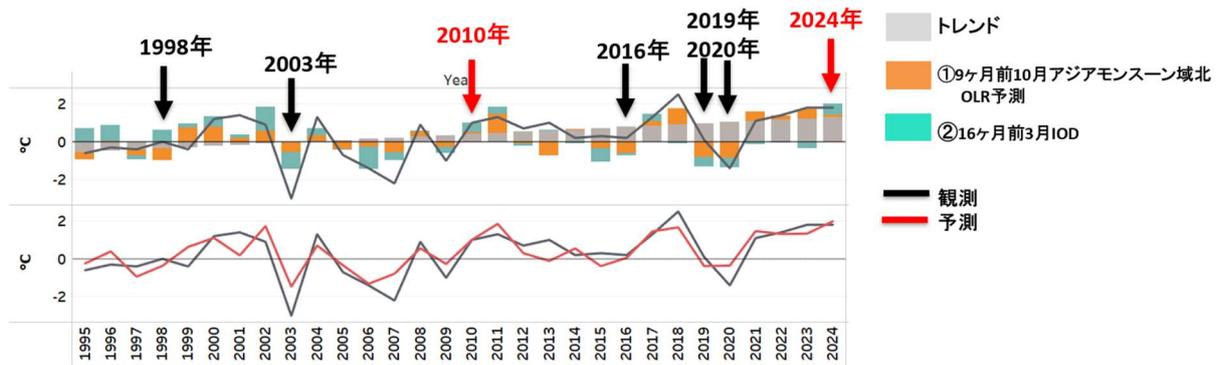


図 4 9ヶ月前時点の東日本日本海側の7月平均気温(平年差℃)の予測 学習期間1995-2018年

上段は各変数の寄与度を示す。年号はエルニーニョ現象もしくは正 IOD の翌年。2010年、2024年7月は顕著な高温となり、指標②が押し上げ要因となっている。

付近の対流活動について、ガイダンスの結果から考察する。

2024年夏は、エルニーニョ現象が終息して迎え、ラニーニャ現象へと向かった夏になる。統計的にエルニーニョ現象の翌夏はインド洋の昇温を通して低温や天候不順となる年が多い(Xie et al.,2009)。1990年以降、インド洋の昇温に繋がるエルニーニョ現象または正のIOD(WTIO-SETIO, Saji et al.,1999)の翌夏で7月から高温となった年は2010年と2024年のみである。5月に発表された気象庁の3ヶ月予報でも、2024年夏は太平洋高気圧が南海上で強く、西日本や沖縄・奄美を中心に湿った空気が流

れ込みやすい予想であった(図3左)。実際には、南海上で太平洋高気圧が強い予想はその通りだったが、フィリピン付近の対流活動は予想よりも活発で、太平洋高気圧は7月から西日本を中心に張り出した(図3右)。

5.2 本ガイダンスによる7月の気温予測

図4は本ガイダンスによる9ヶ月前時点での東日本日本海側の7月の平均気温の予測である。学習期間を2018年までにしたところ、2019年、2020年の低温や、2021年以降の高温を捉えており、選択された指標には妥当性があると考えられる。

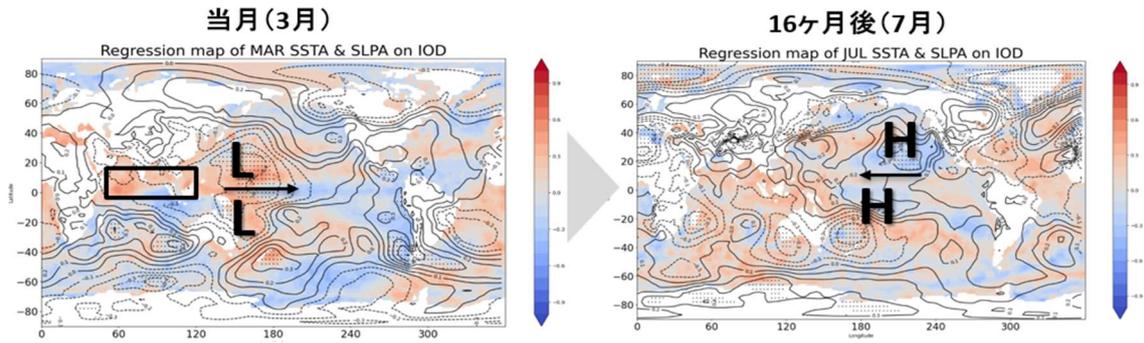


図 5 3月のIODとSST,SLPとの相関図 ERA5 1982-2018年 ハッチはSLPにおいて $P \leq 0.05$

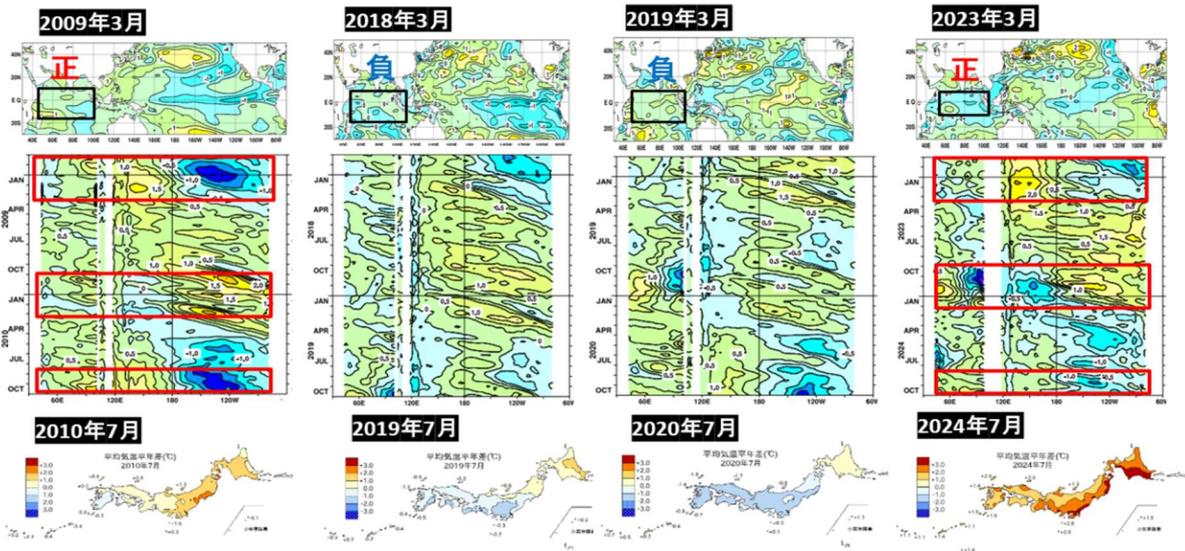


図 6 上段：前年3月の海面水温平年差(°C) 中段：赤道域に沿った海面から深度300mまでの平均水温経度-時間断面図 下段：7月平均気温平年差 出典：気象庁

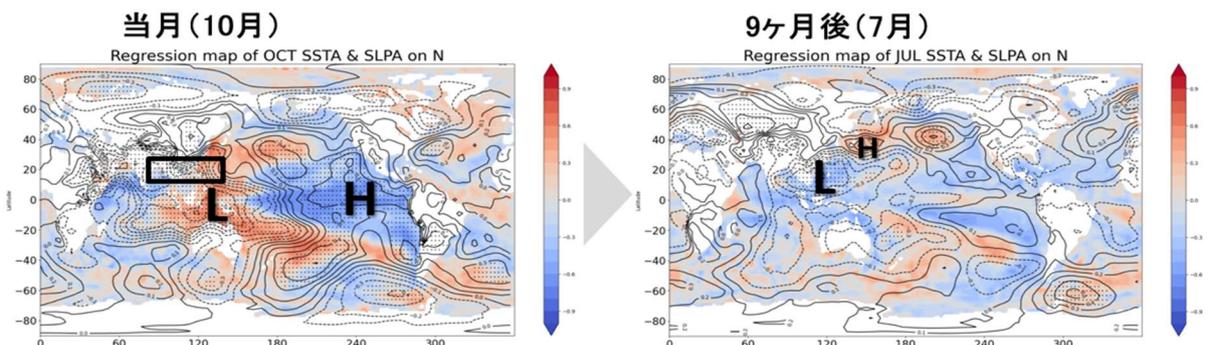


図 7 アジアモンスーン域北 OLR 予測と SSTA,SLP の相関図 ERA5 1982-2018年 ハッチはSLPにおいて $P \leq 0.05$

選択された指標を表 3 に示す。7 月が高温(低温)になる条件として、①9ヶ月前(前年 10 月)のアジアモンスーン域北の対流活動が活発(不活発)である、②16ヶ月前(前年 3 月)IOD が正(負)であることが挙げられる。図 4 上段グラフは、予測における各変数の寄与度を示し、

2010 年や 2024 年 7 月の高温には②の寄与度が高い。

5.3 「前年 3 月の IOD」と 7 月の気温の関係

図 5 は 3 月の IOD と SST,SLP(地上気圧)との相関図を示す。3 月に IOD が正(負)の場合、西太平洋は低気圧(高気圧)偏差で偏東風が

弱まる(強まる)気圧配置になっており、翌年 7 月は中央太平洋が高気圧(低気圧)偏差で、偏東風が強化(弱化)される気圧配置となっている。つまりこの指標は、ENSO の促進や衰退を表していると考えられる。

図 6 より、7 月が低温となった 2019 年、2020 年の前年 3 月は IOD が負を示し、翌夏にかけて ENSO の位相が明瞭でない。7 月が高温となった 2010 年、2024 年は、前年 3 月の IOD が正を示し、翌夏にかけて ENSO の位相が明瞭であった。前冬にはエルニーニョ現象が発達し、夏にかけてラニーニャ現象への移行が早かった。

5.4 「前年 10 月のアジアモンスーン域対流活動」と 7 月の気温の関係

もう一つの指標である 9 ヶ月前(前年 10 月)のアジアモンスーン域北の対流活動の寄与について考察する。図 4 より、エルニーニョ現象および正 IOD の翌夏はこの指標がマイナスに寄与している年がほとんどだが、2010 年や 2024 年はこの指標が寄与していなかった。

図 7 は 10 月アジアモンスーン域北 OLR 予測と SST, SLP との相関図を示す。指標が正(負)の場合はインドネシア付近の対流活動が活発(不活発)で、東太平洋赤道域の SST は低温(高温)、高気圧(低気圧)偏差となり、ENSO の卓越を示す。翌年 7 月はインド洋が低温(高温)偏差であり、アジアモンスーンが活発(不活発)で、日本付近の太平洋高気圧が強まる(弱まる)パターンを示す。これはインド洋キャパシタ効果(Xie et al. 2009)と整合的であり、冬の ENSO と翌夏の関係を示している。

10 月のインドネシア付近の対流活動が活発(不活発)な場合、太平洋赤道域の偏東風は強まり(弱まり)、インド洋赤道域の西風は強(弱)まり、インドネシア付近の SST の高(低)温化が進むと考えられる。図 8 より、2010 年、2024 年 7 月はインドネシア付近の SST が他年と比較して高かった。これが東南アジア周辺の対流活発化と

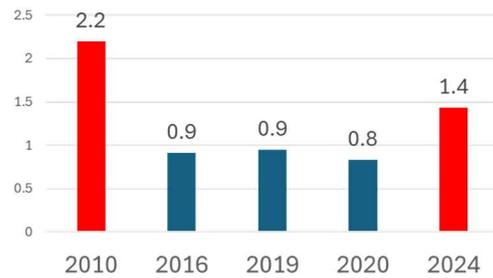


図 8 7 月のインドネシア付近の SST トレンド偏差(標準化) ERA5 1982-2024 年

太平洋高気圧の北への張り出しに寄与した可能性がある。

6. まとめ

熱帯・亜熱帯域の海面水温および対流活動を指標とした機械学習による日本域の季節予報ガイダンスを構築した。顕著な高温となった 2024 年 7 月 8 月の予測は誤差 1°C 以内に収まった地域が多かった。

予測式に基づく要因分析により、2024 年夏は、ラニーニャ現象への遷移の早まりや、インドネシア付近の SST の昇温が高温に寄与したことが示唆され、ENSO の位相や振幅を示す指標を抽出することで、1 年以上前からでも夏の天候を予測ができる可能性が示唆された。

一方、現在の手法では、日本近海の海面水温の上昇や中緯度全体の大気の顕著な昇温が考慮されていないことが誤差の要因として考えられるため、これらの効果的な取り込み方を検討する必要がある。

参考文献

- Cohen, J., Coumou, D., Hwang, J., Mackey, L., Orenstein, P., Totz, S., & Tziperman, E. (2019). S2S reboot: An argument for greater inclusion of machine learning in subseasonal to seasonal forecasts. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 10(2), e00567.
- Gibson, P. B., Chapman, W. E., Altinok, A., Delle Monache, L., DeFlorio, M. J., & Waliser, D. E. (2021). Training machine learning models on climate model output yields skillful

- interpretable seasonal precipitation forecasts. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 159.
- Kuramochi, M., Ueda, H., Kobayashi, C., Kamae, Y., & Takaya, K. (2021). Anomalous warm winter 2019/2020 over East Asia associated with trans-basin Indo-Pacific connections. *SOLA*, 17B-001.
- Saji, N. H., Goswami, B. N., Vinayachandran, P. N., & Yamagata, T. (1999). A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 401(6751), 360-363.
- Tibshirani, Robert. "Regression shrinkage and selection via the lasso." *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology* 58.1 (1996): 267-288.
- Ueda, H., Kamae, Y., Hayasaki, M., Kitoh, A., Watanabe, S., Miki, Y., & Kumai, A. (2015). Combined effects of recent Pacific cooling and Indian Ocean warming on the Asian monsoon. *Nature Communications*, 6(1), 8854.
- Xie, S. P., Hu, K., Hafner, J., Tokinaga, H., Du, Y., Huang, G., & Sampe, T. (2009). Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño. *Journal of climate*, 22(3), 730-747.
- 気象庁:Climate System Monitoring / TCC
(jma.go.jp) (2024.12.01 閲覧)
- 気象庁:
<https://www.jma.go.jp/jma/press/2409/02a/kentoukai20240902.html> (2024.12.01 閲覧)
- 気象庁:
<https://www.data.jma.go.jp/cpd/elnino/houdou/houdou.html> (2024.12.01 閲覧)
- 小越久美,鈴木はるか 熱帯・亜熱帯の対流活動を指標とした季節予報ガイダンスによる2023年夏の予測精度評(長期予報研究連絡会2023要旨)